

## Szakmai zárójelentés

„Hajpál Mónika: Műemléki kőanyagok hő hatására fellépő közettani és közetfizikai változásainak vizsgálata” című OTKA Posztdoktori Ösztöndíjához

### Bevezetés

Minden épületben, így a kőanyagot tartalmazó létesítményekben is keletkezhet tűz. A nem éghető anyagként számon tartott kő is változást szenved a tűz hatására, közettani és közetfizikai tulajdonságai megváltoznak a magas hőmérséklet következtében. A kőzet belső struktúrájának megváltozása magával vonhatja a kőanyagú tartószerkezet károsodását (szilárdsági és stabilitási problémák), és így a teljes szerkezet tönkremeneteléhez vezethet. A probléma abban rejlik, hogy a kőszerkezeteken sokszor nem látszik azonnal a károsodás, ám a változások idővel tragikus következményekkel járhatnak, és akár emberéleteket is követelhetnek. A tűzkárt szenvedett, megrongálódott épületnél az időjárási hatások (fagy, nedvesség) további állapotromlást eredményezhetnek.

Az építőkövek tulajdonságainak hő hatására fellépő változásainak és égéskárosodott formáinak ismerete alapvető a tűzkárt szenvedett épületek kőanyagának konzerválása és kicserélése szempontjából, továbbá ez szolgál alapul a konzerváló anyagok fejlesztésénél és statikai számításoknál.

A kőanyagok tűz-, hőállóságával kapcsolatban mindeddig kevés kísérletet végeztek, és nem folyt célirányos kutatás, így ez a téma, a magas hőmérséklet közettani és közetfizikai hatásainak vizsgálata hiánypótló jellegű. Az eredmények alapján a tűzkárosodott műemléképületek kőanyagának restaurálása megtervezhető és egyértelműsíthető.

### Előzmények

A szakirodalom e kutatási területen hiányosságokat mutatott. A II. világháborús károk kapcsán tettek említést kő részeket is tartalmazó épületek sérüléseiről és ezek kapcsán felmerült a jelenség vizsgálatának szükségessége, de részletes elemzés nem készült (Bessey 1950, BRE Note 1945, Kieslinger 1948, 1949, 1952, 1954). A hőhatásnál a legszembetűnőbb elváltozás a kőzetek színváltozása, így ezzel foglalkozó cikkek fellelhetők voltak (Chakrabarti 1993). A nemrégiben bekövetkező tűzesetek (pl. Hampton Court palota 1986, Windsor-i kastély 1992) kapcsán a „hősokk” ciklusok színre és nyomószilárdságra gyakorolt hatását vizsgálták (Lewry et al. 1992, Chakrabarti et al. 1995), de a kőzetek ásványtani és részletesebb közetfizikai változásaival nem foglalkoztak, és mindent felölelő, globális vizsgálatok sem történtek e témakörben. Magyarországon a kőzetmállás megakadályozása céljából végeztek hevítési kísérleteket (Kőfalvi et al. 1989, Csillag 1988).

### Célkitűzések

Az OTKA Posztdoktori Ösztöndíjat megelőzően 1994-től foglalkozom az építőkövek tűzállóságával, hőhatással szembeni viselkedésével (Koser et al. 1994, Hajpál 1995, Hajpál 1998, Hajpál 2002). Korábban csak homokköveket elemeztem, homogén hevítésnek kitett térben. Az OTKA Posztdoktori Ösztöndíj által támogatott kutatásban célom az volt, hogy a korábbiakban homokköveken végzett vizsgálataimat kiterjesszem, más, műemléki épületeknél használatos kőzettípusokra is, az építőkövek hő hatására bekövetkező viselkedésének globálisabb megismerésére. A magyarországi műemléki kőzetfelhasználásnál a mészkövek a legjelentősebbek, ennek három típusát, a durva mészkövet, édesvízi mészkövet és a tömött mészkövet is egyaránt alkalmazták. A vulkáni tufák is kedvelt építőanyagok, ezért a riolittufát

is bevontam a vizsgálandó közettípusok közé. Ezeken felül az egységes metodika és eredmények értelmezhetősége miatt a hazai homokkövek vizsgálatát is folytattam.

Az egyes közettípusokat azonos módszerrel vizsgálva a magas hőmérsékleti hatásra bekövetkező változásokat és egyes jellemzőiket összehasonlítva átfogóbb képet lehet kapni a kőzetek ilyen jellegű anyagjellemzőiről. Az egységes vizsgálati módszerrel meghatározott eredményeket tovább elemezve és feldolgozva meghatározható a közetfizikai paraméterek és az égetési hőmérséklet egymáshoz való viszonya és ezáltal felállítható az egyes közettípusok egymáshoz viszonyított hőtűrési jellemzése is. Az eddig ismeretlen anyagjellemzők meghatározása segíti a későbbiekben a kőszervezetek tűz- és hőállósági méretezését, ellenőrzését.

## Vizsgálatok

### Vizsgált kőzetek

A vizsgálatokhoz a legjellemzőbb magyarországi műemléki kőanyagokat használtam fel (1. táblázat). Ezek a legtipikusabb és a legtöbb műemléképületnél megjelenő típusok, amelyekből mind szerkezeti, mind díszítő elemeket is készítettek.

1. táblázat A vizsgált közettípusok és jellemzőik

	Név	Kor	Szín	Kötőanyag, ásványok	Porozitás [V%]	$\sigma_{co}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Homokkövek	Balatonrendesi	Perm	bordó	finom vasas (hematit, götit, kaolinit)	6,58	88,21
	Ezüsthegyi	Oligocén	fehér	finom kovás-agyagos (kaolinit, klorit)	16,38	51,22
	Rezi	Pannon	zöldesszürke	közepes jározitos (jarozit, kaolinit, klorit)	18,63	20,81
Mészkövek	Tardosi	Jura	halvány vörös	finom illit, hematit, kalcit	1,07	67,46
	Süttöi	Pleisztocén	krém-drapp	kalcit	13,99	33,78
	Sóskúti	Miocén	sárgás drapp	durva kalcit	32,47	8,89
Tufa	Egertihaméri	Miocén	világosszürke	horzsakő, biotit, kvarc	22,07	5,61

### Vizsgálati módszerek

A vizsgálatokhoz bányákból származó közettömböket használtam. A tömbök anyagából, 4 cm átmérőjű, hengeres próbatestek készültek; a közvetett húzóvizsgálathoz 1:1 magasság:átmérő arányú, az egyirányú nyomóvizsgálathoz 2:1 magasság:átmérő arányú mintákat használtam. A tűz inhomogén hatását kiküszöbölendő, és az ismeretlenek számát redukálva a mintákat homogén hőhatásnak tettem ki. A próbatestek hevítése elektromos kemencében, homogén hőterben történt 6 különböző hőmérsékleten (150, 300, 450, 600, 750, 900°C). A kemence szabályozott felfűtését követően a minták 6 órán át voltak kitéve az állandó magas hőmérsékletnek. A próbatestek a kemencében hűltek ki elkerülendő a sokszerű hűtési folyamat szilárdságot befolyásoló hatását. A mintákat a hevítést megelőzően szobahőmérsékleten (22°C) és az egyes hevítési fázisok után légszáraz állapotban közettani és közetfizikai vizsgálatoknak vettem alá. A belső szerkezet és összetétel változásait megfigyelendő a következő közettani vizsgálatokra került sor:

- makroszkópos vizsgálat, a közettípusok leírása, jellemzése
- polarizációs mikroszkópos vizsgálat (belső szerkezet és ásványok változásainak nyomon követése)
- röntgendiffrakciós elemzés (kőzetalkotó ásványok azonosítása és jellemzése)

- o derivatográfus vizsgálat (ásványok mennyiségi és minőségi változásainak vizsgálata)
- o pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) elemzés (szerkezeti, szöveti és vegyi változásainak megfigyelése)

A közetfizikai vizsgálatok részét képezte:

- o anyag- és testsűrűség meghatározása
- o vízfelvétel meghatározása
- o ultrahang terjedési sebesség vizsgálata (belső szerkezeti változások észlelése)
- o duroszkóp visszapattnás vizsgálat (felületi keménység vizsgálata)
- o egyirányú nyomóvizsgálat
- o közvetett húzóvizsgálat
- o színmérés (optikai jelenség, színváltozás vizsgálata)

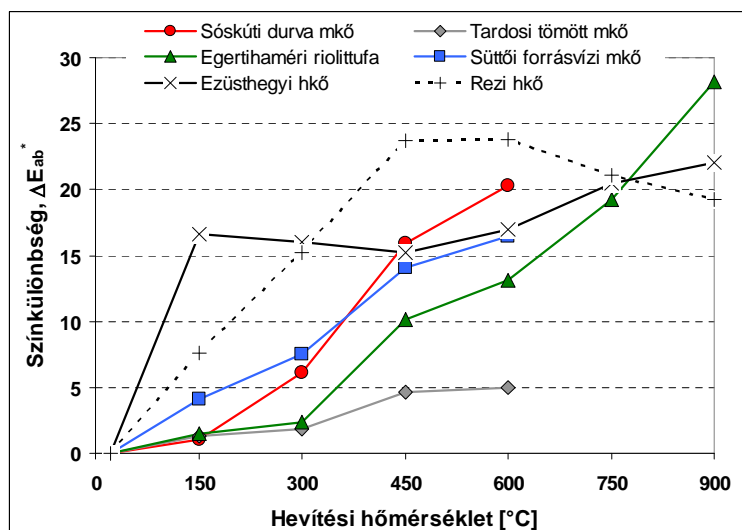
Ezen kívül a közettípusoknál a hővezetési tényező meghatározására irányuló mérésekre is sor került.

## Eredmények



1. ábra Néhány közettípus színmérési próbatestei a különböző hőmérsékletű hevítést követően pár nappal (a) és a tardosi tömött mészkő minták 600, 750 és 900°C-os hevítés után

Mindegyik közetfajtnál szabad szemmel is jól észlelhető volt a hő hatására bekövetkező színváltozás (1.a ábra). A balatonrendesi homokkő a bordóból 300°C-nál kisebb ugrással változik vörössé, aztán a világosabb pirosas színbe megy át. A sóskúti durva mészkő kezdeti halvány sárgás, drappos színe 300°C-nál már narancsos sárgás, 450°C-nál barnás sárga, 600°C-nál barnás szürke, míg efölötti hőmérsékletnél világosas szürkés drapp színű. Külön megemlítenéd, hogy 450-600°C-nál a többitől eltérően sötétes színűek a minták. A süttöi forrásvízi mészkő a kezdeti krém-drapp színből a 300°C-nál tapasztalt szürkés barnás drappon át 450°C-nál sötét szürkévé válik, de ezt követően a magasabb hőmérsékletnél kivilágosodik, kifehéredik (mészégetés). A riolittufa kezdeti drappos világos szürke színe folyamatosan kicsit sötétedik, sárgássá válik, majd narancsossá. A tardosi tömött mészkő halvány vöröses színe igazából 600-750°C-nál kezd barnássá válni, majd ezt követően kívül kifehéredik, de a belsejében sárgás barnás marad). A fehéres színű ezüsthelyi homokkő kezdeti világos színe nem jelentősen változik meg a hevítés hatására, csak enyhe rózsaszínes-sárgás árnyalatot kap. A rezi homokkő kezdeti zöldes szürke alapszíne 300°C-nál már barnás árnyalatúra vált, majd lilás és végül vöröses lesz.



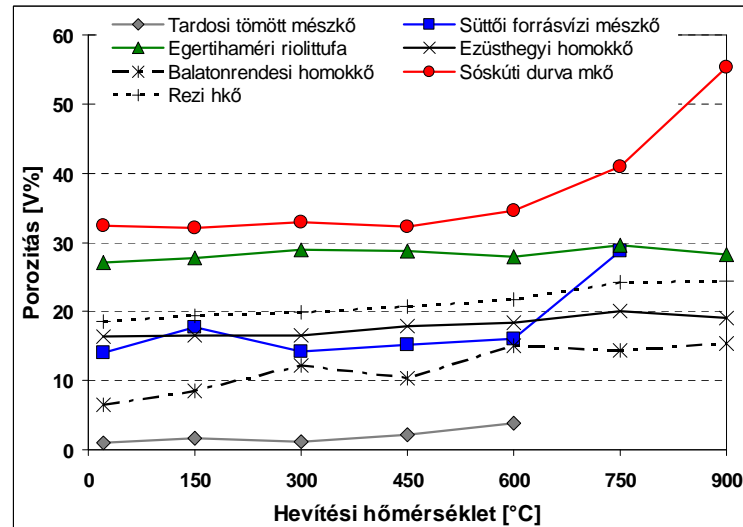
2. ábra A vizsgált kőzettípusok színkülönbség értékei a hevítési hőmérséklet függvényében

Az itt leírt és az 1.a ábrán is szemléltetett színváltozást az egyes kőzettípusoknál CIELAB színmérési módszerrel is megmértem. A kapott  $a^*$ ,  $b^*$  és  $L^*$  értékekből aztán más színjellemzőket is megkaptam. Az összehasonlítás egyik módja a színkülönbség ( $\Delta E_{ab}^*$ ) bemutatása, melyet a 2. ábrán szemléltetnek. Ezen kívül más paraméterek segítségével kimutattam, hogy az egyes kőzETFajtáknál a szín melyik tartományba ( $a^*$  piros-zöld,  $b^*$  kék-sárga,  $L^*$  fehér-fekete) és hogyan tolódik el a hevítési hőmérséklet emelésével.

A mészkő próbatetek hevítése során további jelenségeket lehetett tapasztalni. A tardosi tömött mészkő minták egy része a magasabb hőmérsékletnél szétrobbant a kemencében, a süttői forrásvízi mészkő próbatetek a hevítés során erős záptojásszerű szagot ontottak magukból és a hőmérséklet emelésével feketés elszíneződést mutattak. A minták jellemzőit (méret, súly, hibák, jellemzők) hevítés előtt és után is dokumentáltam. Így tapasztaltam, hogy a minták nagy része (természetesen típustól függően más mértékben) a hőhatás során megnő, valamint repedések keletkeznek (1.b ábra). A mészkő próbateteket a magasabb hőmérsékletű (750, 900°C) hevítést követően a laboratóriumban hagyva azok a levegő nedvességtartalmát magukba szívták, azzal reakcióba léptek és ennek következtében gyorsan szétmentek. Ezt a jelenséget többször tesztelve külön megfigyeltem és azt tapasztaltam, hogy a nedvességtartalom függvényében napok vagy akár órák alatt bekövetkezett a szétesés. Az 1.b ábra jól szemlélteti, hogy a 900°C-os hevítést követően milyen nagy változás következik be a tardosi tömött mészkőben akár a 600°C-os hevítési állapothoz képest is.

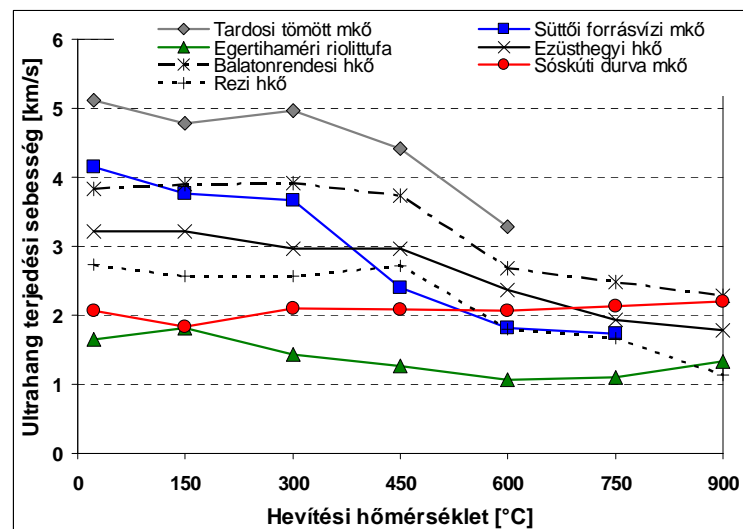
A kőzettani vizsgálatok megmutatták, hogy egyes kőzetalkotó ásványok tönkremennek illetve átalakulnak és újak keletkeznek. A kőzetekben levő kvarc a hőmérséklet emelésével hőtágulást szenved (573°C-nál  $\alpha$ -kvarcból  $\beta$ -kvarccá való átalakulás) és ennek következtében a kőzet belső szerkezete is megváltozhat. A hőtágulás hatására a kvarc szemcsék határainál, valamint azok belsejében mikropedések keletkeznek, miáltal a kőzet porozitása nő. A magasabb hőmérsékleti tartománynál átalakuló, illetve tönkremenő agyagásványok szintén porozitásnövekedést eredményeznek. Az agyagásványok és rétegszilikátok a kvarcnál és földpátoknál sokkal érzékenyebben reagálnak a hevítésre. Alacsonyabb hevítési hőmérsékletnél (300 és 450°C) az agyagásványoknál zsugorpedésekkel találkozhatunk, míg a magasabb hőmérsékleti behatásra egyes ásványok (klorit, glaukonit, kaolinit) belső szerkezete összeesik és az ásvány tönkremegy. Az illit-szmektit szerkezet ezzel szemben sokkal ellenállóbb és még a 900°C-os hevítést követően is fellelhetők. A karbonátoknál már a 450°C-os hőmérsékletnél fellelhetők változások, de a fő ásványtani átalakulások csak a 600°C-os hevítésnél válnak láthatóvá. A 750°C-nál bekövetkező szerkezeti összeomlás a polarizációs mikroszkóppal is nyomon követhető, 900°C-nál a kalcit és dolomit ásványok már nem detektálhatóak és új ásványi komponensek (CaO, MgO) keletkeznek. A CaO aztán a

levegő nedvességtartalmával reakcióba lép és portlandittá alakul. Ez a folyamat nagyfokú térfogat-növekedéssel jár, mely aztán a próbatestek szétesését okozza. A vastartalmú ásványok (götit, jarozit) változása a magasabb hevítési hőmérsékletnél ( $900^{\circ}\text{C}$ ) következik be, mikor ezek átalakulnak hematittá. A hevítés során bekövetkező színváltozást főleg a kőzetben megtalálható vastartalmú ásványok dehidratációja okozza. A forrásvízi mészkő hevítésénél tapasztalt szag a szervesanyag tartalomra utal, ezt jelzi a feketés elszíneződése is.



3. ábra A vizsgált kőzettípusok porozitás értékei a hevítési hőmérséklet függvényében

A kőzettani vizsgálatok során megfigyelt belső szerkezetbeli változások és ásványi átalakulások következtében a kőzetek kőzetzfizikai jellemzői is megváltoztak. Minden egyes típusnál megfigyelhető volt a porozitás növekedése a hevítési hőmérséklet emelésével, csak ennek mértéke volt eltérő (3. ábra). A porozitás növekedését a mikrorepedések keletkezése és a tönkrement ásványok helyén maradt űr okozza.

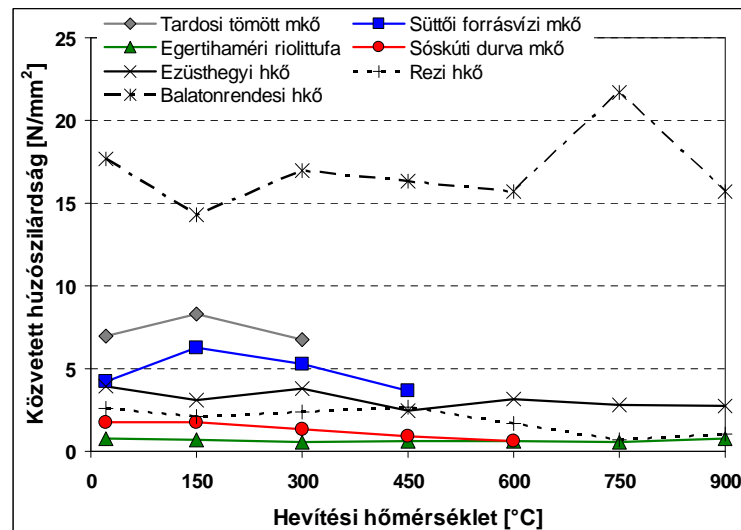


4. ábra A vizsgált kőzettípusok ultrahang terjedési sebesség értékei a hevítési hőmérséklet függvényében

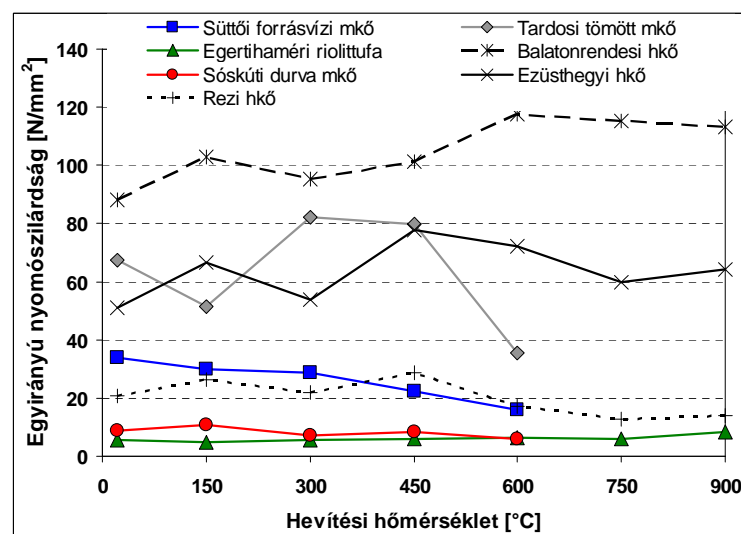
A mészkő próbatestek egy része a magasabb hőmérsékleten történő hevítés során vagy azt követően tönkrement, így azoknál a kőzetzfizikai vizsgálatokat nem vagy csak részben lehetett elvégezni. Ez az oka annak, hogy a kőzetzfizikai jellemzőket bemutató diagrammokon a magasabb hevítési hőmérsékleteknél a mészkővek esetében néhol hiányoznak az értékek.

Az ultrahang terjedési sebesség méréseivel a kőzetekben a hevítést követően fellépő szerkezeti változásokra (pl. repedések) következtethetünk. A 4. ábra jól szemlélteti az egyes típusoknál bekövetkező változást, a sósikúti durva mészkő kivételével minden típusnál

csökkenő a tendencia a hevítési hőmérséklet emelkedésével. Az értékek a 300°C-os hevítési hőmérsékletig szinte nem változnak, jelentősebb változás leginkább a magasabb hőmérsékleteknél következik be. Ennek oka a hőhatásra a kőzetekben kialakuló repedésekkel és új pórusterekkel magyarázható. A riolittufánál szinte folyamatos és egyenletes csökkenést láthatunk, míg a tömött és forrásvízi mészkövekre a 300°C fölötti hirtelen esés a jellemző.



5. ábra A vizsgált kőzettípusok közvetett húzószilárdság értékei a hevítési hőmérséklet függvényében



6. ábra A vizsgált kőzettípusok egyirányú nyomószilárdság értékei a hevítési hőmérséklet függvényében

A szilárdsági vizsgálatok eredményei nem mutatnak egyértelmű tendenciát. Nem lehet állítani, hogy a hevítés hatására a kőzetek szilárdsága csökkenne, mert egyes típusoknál épp szilárdságnövekedésről beszélhetünk. Az 5. ábrán jól látható, hogy a közvetett húzószilárdság a riolittufánál és a balatonrendesi homokkőnél még a 900°C-os hevítést követően sem sokkal tér el a kezdeti, hőkezelés nélküli állapotban mért értéktől. A vasas homokkőnél a 750°C-os hevítés után magasabb a közvetett húzószilárdság, mint a kezdeti, nem hőkezelt állapotban. A 150°C-os hőhatás a mészköveknél is szilárdságnövekedést okoz a közvetett húzóvizsgálathoz és a szilárdság csak ezt követően a hevítési hőmérséklet emelésénél kezd el csökkeni és 600°C felett már nem is mérhető.

Az egyirányú nyomószilárdságnál (6. ábra) pedig egyértelmű szilárdságnövekedésről beszélhetünk a vasas homokkő esetében, de a riolittufa és kovás homokkő is jól bírja a hevítést. A közvetett húzóvizsgálathoz hasonlóan a mészkövek nyomószilárdsága a 300°C-os



hevítési hőmérsékletig nem csökken jelentősen (sőt a tömött mészkő esetében 450°C-ig még nő is) a kezdeti, 22°C-os állapothoz képest, csak az előtti hőmérsékleteknél, de 600°C fölött már itt sem mérhető.

A posztdoktori ösztöndíj segítségével beszerzett vízszintes kemence segítségével nagy, vékony kőzetlapokon mértem a hővezetési tényezőt különböző hőmérsékleten. A magas hőmérsékleteknél sajnos ez a módszer még nem tökéletes, mert egyes kísérleti paraméterek mérése még nem megoldott (a beszerezhető hőárammérő lapok nem bírják a több száz °C-os hőmérsékletet), ennek kiküszöbölése a tervezett jövőbeni kutatások részét képezi. A vízszintes kemencébe helyezett kőlapoknál a kialakuló hőmérsékletet termovíziós kamerával is nyomon követtem.

## Következtetések

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a vizsgált típusok közül a homokkővek a leginkább hőállóak. A balatonrendesi vasas kötőanyagú homokkő mutatja a hevítéssel szembeni legkedvezőbb tulajdonságokat. Mérsékelt porozitásban nem következett be dármai növekedés. Bár 450°C-os hőmérséklet fölött keletkeznek belső repedései, és ásványai közül néhány tönkremegy, még a 900°C-on történő hevítést követően is jó szilárdsági tulajdonságokkal rendelkezik a vastartalmú ásványok jelenlétének köszönhetően. Az egertihaméri riolittufa, bár inhomogén szerkezetű (eltérő fajtájú, nagyságú komponensek alkotják) szilárdságában szintén kedvezően reagál. Porozitása alig változik, és bár belső szerkezete megváltozik, szilárdsága a legmagasabb hőmérsékletek esetén is megőrzi. Az ezüsthelyi kovás-agyagos és a rezi jarozites homokkőtípusok egyenletes, de mérsékelt porozitásnövekedést mutatnak a hevítési hőmérséklet növelésével, ami szerepet játszik abban, hogy szilárdságukat jól tartják. A mészkővek hőállósága - igazolva egyes előfeltevéseket - rosszabb a homokkővekénél. Fontos ugyanakkor, hogy a drasztikus szilárdságvesztés elsősorban a vizsgált hőmérséklet-tartomány felső felén következik be. Az eredendően is igen porózus szerkezetű sósúti durva mészkő porozitásnövekedése a hevítés során kezdetben jelentéktelen. Ezzel összefüggésben ennél a mészkőtípusnál figyelhető meg a legkiszámíthatóbb és legkisebb szilárdságcsökkenés. A ridegebb tardosi tömött és süttői forrásvízi mészkővek sokkal drasztikusabban reagálnak a hevítésre és szilárdságukat hirtelen veszítik el.

A hőterheléses vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a különböző kőzETFajták eltérően viselkednek hevítésnél. A kőzetek ásványos összetétele, szemnagysága, belső szerkezete egyaránt befolyásolja azok viselkedését. A kevésbé kompakt, homogénebb, finomszeműbb, kötőanyagban gazdag fajták kedvezőbben reagálnak a hőhatásra, mint a tömött szerkezetű, inhomogén, durvább szemű típusok. A szemcsék közötti kontaktus is befolyásolja a változásokat, előnyösebb, ha a szemcsék között kötőanyag vagy kitöltés található, mely a szemcsék egyenetlen hőtágulását tompítja. Szintén lényeges körülmény a szemcsék és a kötőanyag aránya és a kőzet eredendő porozitása. Ez figyelhető meg a sósúti durva mészkőnél, melynek ugyan nincs nagy kezdeti szilárdsága, de ezen a hevítés nem is ront olyan sokat, mint a másik két vizsgált mészkőfajta esetében.

A kutatáshoz kapcsolódó nemzetközi együttműködésként részt vettem 2004-2007 között egy magyar-portugál TÉT (NKTH 437/2005 „Tűz hatása a kőzetekre”) és 2005-2006 között egy magyar-spanyol TÉT (NKTH 569/2005 „Természetes eredetű építőanyagok és kőzetek viselkedése tűzben”) bilaterális pályázatban, valamint a már lezárt COST Action C17: Built Heritage: Fire Loss to Historic Buildings (COST 327/01) nemzetközi projektben. Jelenleg kutatási eredményeimet is felhasználva a COST Action C26: Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events projektben (2006-2010) tevékenykedem.

**Irodalom**

Bessey G.E.: Investigations on building fires, Part II. The visible changes in concrete or mortar exposed to high temperatures. National Building Studies, No. 4: 6-10, London, 1950

BRE Note, No. 21.: Repair of Damaged Buildings - the repair of stone-work damaged by fire. Garston BRE Note, No. 21, Building Research Establishment, Garston, 1945

Chakrabarti B.: An assessment of effects of fire damage to stone in buildings & procedures for restoration and conservation of stone in some historic stone buildings. BRE Note, N 15/93, Garston. 1993.

Chakrabarti B., Yates T., Lewry, A. :Effect of fire damage on natural stonework in buildings. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 7: 539-544, Elsevier Science Ltd. 1995

Csillag, J.: A sárospataki tufák vizsgálata. Országos érc- és ásványbányák, Eger, 1988

Hajpál, M.: Feuerfestigkeitsuntersuchungen der Sandsteine von Baudenkmälern. Diplomadolgozat, Budapesti Műszaki Egyetem, 1995

Hajpál, M.: Az egri várszékesegyház romterületének diagnosztikai vizsgálata és helyreállítási javaslata. Szakdolgozat. Budapesti Műszaki Egyetem, 1998

Hajpál M.: Égetés hatására fellépő változások vizsgálata homokköveknél (PhD értekezés), Budapest, 2002

Kieslinger, A.: Brandschäden an Natursteinen. Oesterr. Zeitschrift f. Denkmalpflege, 2 Heft 1/2, Wien, 1948

Kieslinger, A.: Die Steine von St. Stephan. Verlag Herold, Wien, 1949

Kieslinger, A.: Effects of fire on Building Stones. The Quarry Manager's Journal, London, 1952

Kieslinger, A.: Brandeinwirkungen auf Natursteine. Schweizer Archiv, 20: pp 305-308, Solothurn, 1954

Koser E., Brein D., Hajpál M., Prein M., Karotke E., Althaus E.: Das Baumaterial der Burg Hohenrechberg im Brandexperiment; Mineralogische und petrophysikalische Untersuchungen, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke SFB 315 Jahrbuch 1994, Karlsruhe, Ernst & Sohn, pp 199–206, 1994

Kőfalvi V., Lőcsei J., Horváth Z.: Összefoglaló jelentés a sárospataki Vöröstorony reneszánsz faragványainak restaurálását célzó anyagtudományi kutatásokról. Országos Műemléki Felügyelőség, Budapest, 1989

Lewry A., Asiedu Dompok J., Ferrier, W-Butlin R.N.: The decay of stone masonry subjected to actual and simulated fire situation. BRE Note N72/92, Watford, 1992